

正鵠を射られた活力論争

——「運動の計測度。－仕事」（『自然の弁証法』F. エンゲルス）で明かされたその本質——

樋浦 明夫

表題のエンゲルス論稿の冒頭に、エンゲルスにとってよほど脇が甘く見えるらしい科学者ヘルムホルツの『通俗講演集』（1871年）中の「仕事と仕事の不変性という物理学上の基本概念が大変とらえがたいものだということと、これらの概念が特殊な抽象的概念だということ。だから、カントのような精神の持ち主にとってさえ、それらの概念の理解が苦もなくできたわけではなかった。それは、カントがライプニッツに対しておこなった論争でも分かる…」という文章が引用されている[2]。これに対して、エンゲルスは、この文章で四回も使われている概念ということばを取り上げ、概念が問題になるところでは、弁証法的な思考はすくなくとも数学的計算でいけるところまではいけるはずだとシニカルに見通しを述べている。この論稿[2]では、二つの力学的運動の尺度と、それと仕事の概念との関連が活力論争を基に論じられている。

活力論争小史

活力論争は、1686年にG. W. ライプニッツ（ドイツの著名な数学者、哲学者、1646–1716）による「自然法則に関するデカルトらの顕著な誤謬についての簡潔な証明」（略して、「短証明」）と題する一論文が『ライプニッツ学術紀要』に掲載されたことに始まった。ライプニッツは、一物体の運動を測る尺度としては「質量と速度の二乗との積をとる」ことを提案し、「物体の運動の量は質量と速度との積に比例する」としたR. デカルト（フランスの哲学者、数学者、自然科学者、1596–1650）の運動論を批判した。ここに至って、デカルト派とライプニッツ派との多年にわたる有名な「活力論争」が展開されることになった。すなわち、運動は mv で表されるべきか（デカルト派）、 mv^2 で表されるべきか（ライプニッツ派）という二大陣営の論争である。この論争の開始から54年後にシャトレ＝メーラン論争が起こった。川島慶子の論文[3]を引用して、それについて簡単に触れたい。

フランスの啓蒙思想家ヴォルテールの愛人でもあったデュ・シャトレ公爵夫人は、『物理学教程』（1740年）でライプニッツ説（活力説）の立場からアカデミー終身会員のメーランの論文を批判した。メーランの「活力論争は単に名前の争いで、活力はまちがった理論」という立場に対して、シャトレは、「活力論争は完全に数学的な問題の内で決められるようなものではない。…だからこの論争は断じて名前の問題ではない」と自説を主張した。さらに、シャトレは、「活力は全体として常に保存されるもの。非弾性衝突での活力の非保存（減少）に関しては、ライプニッツ、ベルヌイと同様に見かけは力が消費されるように見えても、これは物体の微小部分の移動や凝集力の強化等に使用され、決して失われることはない」と、現在から見ると不明瞭なことば遣いだが、かなり正確に運動の保存性をとらえている。川島は、この二人の論争を一方は死力の側（デカルト派）、他方は活力の側（ライプニッツ派）からの典型的な活力論争と言っている。女性が「無力化された集団」とみなされていた時代に保守的なアカデミー会員を相手取ったシャトレの論争は果敢な挑戦だった。エンゲルスはこの論争には言及していない。

H. ズーター（スイスの数学者、1848–1922）は、「この 40 年の長きに亘る無益なことばの争いは、J. ダランベール（フランスの数学者、物理学者、哲学者、1717–1783）の『動力学概論』（1743 年）の鶴の一声で終わった」と評した。事態をはっきりと見通していたわけではなかった若きカント（これはエンゲルスの見解。以下、エンゲルスの見解を E と表記する）はその処女作『活力の正しい評価についての考察』（1746 年）で論争に参加した。だから、I. カント（ドイツの代表的な観念論哲学者）の活力論争への参加は、この論争の開始から 60 年も経ってからで、ダランベールの鶴の一声でこの論争が鎮まったと言われてから 3 年後である。

エンゲルスは、ライブニッツほどの人からデカルトほどの人に対して提起され、カントほどの人の関心をひいて大部の著書を捧げることになったこの論争がことごとく無益なことがあるうかと、疑問を呈した。では、エンゲルスほどの人が、ダランベールの鶴の一声からでも 130 年以上も経っているこの論争を再びとりあげた意義はどこにあるのだろうか。エンゲルスの論稿を基にその意図を探るのが本小論の目的である。

前記の文献 [3] に、「近年、この論争を様々な視点から見直そうという動きが出始めた。…重要なのは保存の普遍性なのか、それとも特殊条件下（弾性体でのみ、等速運動でのみ等々）だけで成立する法則なのか。物体の構成要素の力の保存まで考えるべきか。その時の神の位置は、人間の自由意志はどうなのか。旧来の見方はこういう事情を無視して、エネルギー保存への一本道があるという前提のもとに立てられた一つの史観にすぎない」とある。それらの疑問に何らかの意味があるか否かは、エンゲルスの論稿をたどれば自ずと明らかになると思われる。

1 活力論争の問題点

エンゲルスは、ズーターの『活力』という表現はもはや力の尺度として通用しているのではなく、力学ではきわめて意味のある質量と速度の二乗の半分とを掛け合わせた積 $\left(\frac{mv^2}{2}\right)$ を表す単なる記号、それも昔、用いられた記号というだけのものでしかない。 mv は依然として運動の尺度であるが、活力は mv^2 の別な表現にすぎない」を取りあげ、記号が意味するものは何かということがますます分からない、と言っている。ダランベールの鶴の一声はこれに答えてくれるだろうか、と彼の『動力学概論』の序文が紹介されている。ダランベールにとって「力学にとっては全く無益」に映る論争なので、本文ではなく序文で論及されている、とエンゲルスは皮肉っている。その「力学にとって全く無益」という点について、言語記号は代数式の別の名称にすぎないので、純粹に計算的な力学では正しい（記号をどのように変えても、計算の範囲では問題にならない、ということ）、と中身の無い記号だけを問題にすることは無益だと諧謔的に言っている (E)。

1.1 ダランベールの「鶴の一声」

ダランベールは、同一の力に二通りの尺度があるとして、平衡の場合（同一の質量と速度を持った 2 物体が向き合って静止した場合。ライブニッツによる死力としての圧力に相当。静止している物体が持っている運動量 $= mv$ ）と、遅滞運動の場合（異なった質量と速度を持った 2 物体が向き合い、力の少ない方の物体の抵抗で徐々に運動が遅滞する場合。ライブニッツによる活力に相当。ある速度をもって運動している物体の運動量 $= mv^2$ ）を挙げている。ダランベールによる力は、障害に打ち勝ちまたはそれらに抵抗する際に生ずる効果を意味し、抵抗のこのような総和が運動量 mv に比例する。さらに、遅滞運動の場合でも、これらの障害の示す

抵抗の総和によって測ることにすれば、やはり尺度として通用するから（この場合も、抵抗の総和が運動量 mv に比例する）、平衡の場合も遅滞運動の場合にも共通の尺度が利用できる、とする。具体的には、ある質量を持つ物体が速度 1 から 2 倍、3 倍になったときに縮めるバネの数を単位時間当たりに求め、その結果として $mv^2 = mv$ だとしている。これをエンゲルスは、数学的な小細工で問題を解決したと思い込んでいる、と反駁した。

上述の評言以後のダランベールの言い草、「この論争はきわめてくだらない形而上学的な議論か、さもなければそれ以上に無価値な単なることばの争いがありうるにすぎない」を、無遠慮な野郎自大ぶりと酷評している (E)。ダランベールの「鶴の一声」は、結局、「作用を所要時間で割れば mv^2 から再び mv に到達するということに帰す」(E) ことだと直截に述べている。これは、カトラン (17 世紀フランスの大修道院長、デカルト派の物理学者) がかつてライブニッツに反論する際に用いた論証と同じ仕方の論法だと言っている。つまり、速度 2 を持つ物体は、速度 1 の物体に比べて、重力に抗してその 4 倍の高さまで上がることは確かだが、そのためには 2 倍の時間を必要とする。だから、運動の量はこの時間で割らなくてはならず、それは 2 であって、4 ではないという論法である。これは、「活力」という表現から論理的な意味をとりのぞき、数学的な意味だけを残した見解、だと批判している (E)。「活力」という表現の中身を骨抜きにして、いわば数学的につじつまを合わせたにすぎないという意味である。質量 m 、速度 1 の物体の速度を n 倍すると、 n^2 の高さまで上げることができるが、 n 倍の時間がかかる。だから、運動量 mn^2 (mv^2) を n で割ると mn (mv) になる、という数学的な操作にすぎない。しかし、 mv^2 と mv は単位時間当たりの運動量で比較できない質的な差異を含んでいる。また、カトランの論証は、 mv^2 (ライブニッツ派) と mv (デカルト派) とをつなぐ架け橋の一つであることに意義がある (mv^2 と mv の関連について考えるきっかけを与えたということ) と、言っている。

ところが鶴の一声にかかわらず、ダランベール以後の研究者は彼の一声を受け入れたわけではなく、ライブニッツによってなされた死力と活力との区別にダランベールが与えた表現、つまり、平衡 (静力学) に対しては mv が通用し、制動された運動 (動力学) に対しては mv^2 が通用するということに固執した (E)。しかし、この使い分けは、下士官が自分を指すときに使う現役中は *Mir*、退役後は *Mich* という区別以上の論理的な意味はないと、どちらも中身のない形式的な使い方であることを指摘した。この引喩はエンゲルスが將軍と^{あだな}緋名されていたことをほのめかしている。

1.2 活力論争の本質

W. トムソン (ケルヴィン卿、イギリスの物理学者、1824–1907) と P. G. テート (スコットランドの物理学者、1831–1901) による共著『自然哲学論稿』(1867 年) では、「回転することなく運動している剛体の運動量あるいはモメンタムはその質量と速度とに比例している。…運動している物体の活力または運動エネルギーはその質量と速度の 2 乗とにともに比例している」と、このあい矛盾する二つの尺度は併記されていて、この矛盾を解決するためのわずかの試みもない (E) と、無頓着な運動の尺度の使用を非難している。このように、17 世紀末に始まった活力論争は、エンゲルスのこの論稿が執筆されたのが 1880–81 年だから、実に 200 年近い年月が経ってもまだ真の意味での解決はなされなかった。そこで、エンゲルスは、なぜ運動は二通りの尺度を持っているのか、科学の上でも許容すべからざるこういう事柄 (二通りの尺度が無頓着に使用されていることを指す) を納得のいくようにする必要があると、改めて根本的な

ところから問題を提起した。

では、エンゲルスはどのようにこの論争に立ち向かったのであろうか。以下にエンゲルスの論証をたどってみることにする。 mv という尺度で測られるのはある力学的装置によって伝達される運動（ヘルムホルツ）だから、この尺度は槌子に由来するあらゆる形態（滑車、ネジ等々）、要するに伝達装置全てに通用する（E）。この場合、 mv が通用すれば mv^2 もまた有効だということを明らかにするには、ごく簡単な、別に新しくもない考察で十分なのである、と言ってある力学的な装置（アルキメデスの槌子。両側の槌子の腕の長さの比が4:1、したがってこの装置では1 kgの錘が4 kgの錘とつり合っている）を仮定して次のように mv と mv^2 の場合に分けて説明している。

1.3 エンゲルスによる論証

1) mv の場合

両方の錘がつり合っている平衡状態で、わずかな力を4 kgの錘の腕に加えることで、1 kgの錘を20 mだけ持ち上げることができる。同様に、1 kgの錘の腕に少しの力を加えるだけで、4 kgの錘を5 mだけ持ち上げることができる。すなわち、 $mv(1 \times 20) = 20 = m'v'(4 \times 5)$ となる。力を加えた方の錘が下がるのと他方の錘が上がる時間は同じだから、上がった距離が各々の錘の速度となる。これは、力がゼロの状態から外力が加えられた場合で、運動量が $mv = m'v'$ は、互いに反対方向（ $\rightarrow \leftarrow$ ）に押し合い、平衡状態（静止）になった場合に相当する。外力が加えられる間、運動は持続するが、外力が加えられないと停止するような運動である。いわゆる、受動的、外発的、消極的な運動といえる。

現在、 mv は運動する物体の運動量（勢い）を示す量と定義されている。運動量の時間的な変化が力である（力 $F = \frac{d}{dt}mv = \frac{d}{dt}p$, $p = mv$ ）。力とその力が作用した時間との積を力積 (kg·m/s) という。従って、力積は運動量の単位でもある。

2) mv^2 の場合

ここではさしあたり、活力を表す単なる運動量 mv^2 がとりあげられている。 $\frac{mv^2}{2}$ との関連については後述される。それぞれの錘を持ち上げておいて、つり合っていた元の高さまで自由落下させる。ポテンシャル・エネルギーのある状態から、そのエネルギーがゼロになる場合ともいえる。1 kgの錘を20 mの高さに持ち上げて落下させると、20 mの距離を下降して、毎秒20 mの速度を得る（ $v = \sqrt{2gh}$ から算出、 g は重力の加速度 ≈ 10 m/秒²、 h は落下距離。ヘルムホルツはこの式から、 $\frac{mv^2}{2} = mgh$ を導いた）。また、4 kgの錘を5 m持ち上げて落下させた場合は、5 m下降して毎秒10 mの速度を得る。落下時間は、4 kgの錘は5 mを1秒で、1 kgの錘は20 mを2秒で落下する（最終速度を重力の加速度10 m/秒²で割ると落下時間を得る。摩擦や空気抵抗を考慮しない）。すなわち、 mv^2 ($1 \times 20 \times 20$) = 400 = $m'v'^2$ ($4 \times 10 \times 10$) となる。それぞれの錘がそれぞれの高さから落下した後では、その運動は停止している（片方の錘が下がった分だけ、運動量は他方に移動し、他方の錘は上がって両方の錘は平衡状態になる）。以上のことから、 mv はたんに伝達されるところの運動（＝持続する力学的な運動を測る尺度）、 mv^2 は消失した力学的な運動を測る尺度（運動エネルギーの大きさ。この場合、片方の錘の消失した力学的な運動は他方の錘が上がる力となる）を指す。ここに、 mv と mv^2 における形式的ではない、内容のある理論的な違いが示されている。

次に、 mv^2 が使用される若干の場合を検討してみようと話を進め、力学でよく用いられる

「 mv^2 は抵抗に打ち勝つために必要とされる」とはどういうことかについて考察している。ここでは、自然現象の弁証法的な相互転化の過程 [7] を想像すると理解しやすい。「錘を持ち上げることによって重力の抵抗に打ち勝つ」という場合、持ち上げる過程である量の力学的な運動が消滅するが、その分量は持ち上げられた錘がその高さから元の高さに落下することによって作り出される運動の量に等しい（錘の質量と落下した時の最終速度の二乗との積の半分、 $\frac{mv^2}{2}$ で表される）。持ち上げることで、力学的運動（力）としては消滅するが、それは形を変えたポテンシャル・エネルギーになったのであって、この力は錘を持ち上げた高さから落下させることで、持ち上げた時と同じ量の力学的な運動にもどすことができる（E）。それゆえ、ポテンシャル・エネルギーは活力の消極的な表現（物理的な運動としては消滅するから）でもあるし、逆に積極的な表現（落下させると持ち上げた時と同じ力を生むから）でもある（E）、ということになる。エンゲルスは、「静止は運動の一つの特殊な場合である」と言った G. R. キルヒホフ（ドイツの自然科学的な唯物論者、物理学者、1824-1887）の文章を引用して、「計算だけでなく、弁証法的な思考もなしうることを自ら証明している」と賞賛した。

エンゲルスは、自他ともに認める「将軍」としての見識をいかんなく発揮して、物体の衝突によるエネルギーの保存について砲弾の衝突を例にして論じている。24 ポンド（約 12 kg）の砲弾が毎秒 400 m の速さで厚さ 1 m の装甲艦の鉄壁に衝突したとすると、ある力学的運動が消失し、それは $\frac{mv^2}{2}$ に等しく、 $12 \times 400 \times 400 \times \frac{1}{2} = 960,000$ キログラム・メートルになる。この消失した運動の行方を、熱単位の力学的等量（424 キログラム・メートル）と鉄の比熱（0.1140）から算出した衝突時の弾丸の灼熱温度（828 度）に求めた。このことから、摩擦の際にも力学的運動は消滅して、別な形態のエネルギー（熱）となって再現することを示した。蒸気機関などの力学的な力を利用して、磁気的機械（ダイナモ）によって電流を作る場合も、電流のエネルギーは一定時間の間に消費された力学的運動に比例し、同じ尺度で表せば両者は等しくなる（E）。したがって、力学的運動としては消滅して、ポテンシャル・エネルギー、熱、電気等々の新たな形で復活してくるという仕方では伝達が起こる時（力学的運動が他の形態の運動に変わる時）には、この新しい形態の運動の量は初めの運動物体の質量とその速度の 2 乗との積に比例する（E）、ということになる。これらをまとめると、 mv は力学的運動を尺度として測った力学的運動（ mv という運動量を持った、外力が作用する限り持続する純粋な力学的運動）を、 mv^2 は、ある特定の分量の運動が他の運動形態に変わりうるその能力（活力）を尺度として測った力学的運動を表す（E）、のである。

現在の物理学では、運動量 mv は大きさと向きをもつベクトル量を、活力 mv^2 は質量、速さ、温度などと同じく大きさだけで定まるスカラー量を表し、互いに異なる物理量とされている。

上記のことから、ライブニッツ派とデカルト派の論争がたんなる言葉のうえの無意味な争いではなかったということと、ダランベールの「鶴の一声」は実際にはなんの解決ももたらさなかった、ということが理解される。ダランベールは、この論争の先行者と同じ程度に曖昧だったのだから、先行者の曖昧さに毒づかなければ良かったのだと、たしなめている。見かけ上はなくなってしまった力学的運動がどうなったのか理解できなかった間は、先行者はいやでも曖昧なままでいなければならなかった。先行した個々人の能力だけではなく、時代的な制約も曖昧さの原因だったと柔軟に述べている。さらに、自分自身の殻の中にかたくなに閉じこもっている限りでは、ダランベールと同様に曖昧のままで、空虚で矛盾だらけの言い回しでごまかさざるをえない（E）と、弁証法的な思考に思い及ばない物理学者をなじっている。こうした物理学者、数学者にはダランベールはもちろんのこと、ズーター、トムソン、テート、ヘルムホルツ、そしてマクスウェルなど錚々たる人物が含まれる。

2 運動と仕事の概念

現代（エンゲルスの時代）の力学は、力学的運動が量的にはそれに比例する他の運動形態に移行するこのような形態変化を、「力学的運動は仕事をした。しかも、これこれの仕事をした」と表現しているが、物理学的意味での仕事の概念はこれに尽きるものではない、と言っている（E）。それは、熱が力学的運動に、熱が電気に形を変えること等々、これらの全ての過程にあって、それぞれの過程を導き、その過程を通じて別の運動形態に変えられるところの初めの運動形態が成し遂げているものこそが仕事といえるのであるから、量的側面から考察した場合の運動の形態変化が仕事なのだと、明確に述べている。つまり、仕事の概念は力学的運動のみから他の運動への形態変化を意味するのではなく、運動の形態にこだわらなければ、エネルギーの量的な変化が仕事の目安になるということである。従って、「仕事とエネルギーの単位は、特別な人名単位「ジュール」になった。これは、仕事とエネルギーが力学の現象だけにとどまらず、熱現象なども含んだより包括的な保存則として自然現象全般に通ずる概念であること」[2]ということになる。こうして、数理力学によらなければ極めて理解しがたいと言われていた仕事の概念は、力学的運動の二つの尺度を考察することで全く片手間に、楽々と、またほとんどひとりでに得られた（E）わけである。

文献 [5] に、「力 F の作用をそれが働いた時間 t との関連で見れば、 mv が力の測度（尺度）となり、同じく力 F が作用した距離 s との関連で見れば、 $\frac{mv^2}{2}$ が力の測度となる。…デカルト派、ライブニッツ派が唱えた力の測度は、それぞれに正しいといえる。ただ、両派の力の概念には、それぞれ時間及び距離の概念が含まれていたのである。」と説明されている。 mv と $\frac{mv^2}{2}$ がどちらも独立した異なる意味を持つという点では正しく見える。速度の概念は元々、時間と距離を内包しているから、 mv も $\frac{mv^2}{2}$ のどちらも時間と距離に関係しているのは自明である。つまり、どちらでも力 F は運動量と作用する時間、移動距離が必然的に関係する。ヘルムホルツは、質量 m の物体が距離 h まで落下した時の運動量は mgh （ g は重力の加速度）で表され、これは落下速度を v とすると $\frac{mv^2}{2}$ と同じである（ m を v の速度で h の高さまで持ち上げた場合も同じ運動量）ことを証明した。ここでは、運動量が時間と距離とに直接関係しない量（時間と距離が捨象されている）として表されている。しかし、 mv と mv^2 を時間と距離を強調して規定すると、先のカトランやダランベールの論証のように mv と mv^2 が同じという奇妙な結論に帰結する余地を残す。やはり、 mv は単なる運動量を表し、 $\frac{mv^2}{2}$ は他の形態の運動に転化できる（仕事をする）ところの運動エネルギーを表す活力という概念で区別したとらえ方が重要である。だから、両派とも運動の形態変化に気が付かなかった限りで、正しかったとは言えない。

ヘルムホルツの『力の保存について』（1862 年）に関し、「仕事は熱単位で表され、力学的な力や熱の他に化学的、電気的な力が仕事をすることができ、全自然における作用能力のある力の総和は自然の中でどのような変化が起ころうと、永久に変わることがなく同一」と、エネルギー保存の法則について述べているが、仕事の概念について触れていないことを指摘した（E）。エンゲルスの目から見ると、ヘルムホルツは「仕事の量の不変」（エネルギーの保存）ということに目を奪われ、質的な変化、つまり物理学的な仕事の根本条件である形態の変化を見ていない、ということになる。木（エネルギー保存の法則）を見て、森（仕事）を見ずと言え。ヘルムホルツの『通俗講演集』の中の文章、「摩擦と弾性衝突とは、力学的な 仕事が消滅させられた代わりに熱がつくりだされる というような過程である」を取りあげ、「この場合は力学的な 仕事が消滅させられたのではなく、力学的な 仕事 がなされた のである。見かけ上消滅させられ

たのは 力学的運動 なのである（下線は筆者による）」(E) と、衝突することで力学的な仕事となされ、その結果、熱が（運動の形態変化による）生じるわけで、ヘルムホルツがいかに仕事という概念の使い方を誤っているかについて記している。この物理学用語の使用の曖昧さは「仕事」の概念の定義づけをできなかったヘルムホルツの弱点が表面化したためである。

最後に、仕事の尺度の表し方の変遷について触れている。一定の力学的運動の中に含まれる仕事の能力のことをこの運動の活力といい、それは最近まで mv^2 を尺度として測られていた (E)。ヘルムホルツの『力の保存について』の中の、「 $\frac{mv^2}{2}$ で活力の量を表すことが提唱されていて、その量は仕事を測る尺度と同じ。活力の概念をこれまで通り使用していくうえでは、…このような変更は意味がないが、以下の場合には本質的な利益をもたらす」という文章を引用し、ヘルムホルツは自分がいかに重要な発見をなしとげたかをまるで意識せず、 $\frac{mv^2}{2}$ を mv^2 より便利だという点だけでその使用を推奨している、と言っている (E)。そこで、「活力とは所与の力学的運動の量が仕事をする能力に他ならないことを知ったわれわれにとっては、この仕事の力学的尺度による表示と、その表示によって実際に成される仕事とが互いに等しくなるはずだということは自明であり、従って $\frac{mv^2}{2}$ が仕事を測る尺度ならば、活力もまた同じく $\frac{mv^2}{2}$ を尺度とすることも自明である」(E) と、ヘルムホルツの曖昧な尺度の使用を批判している。同じ使い方（特別な利益と数式の使いやすさ、という理由）をしているトムソンとテートも当然批判の対象になっている。

なぜ運動エネルギー（仕事）が $\frac{mv^2}{2}$ と表されるのか理解するのは門外漢にとってなかなか難しい。ちなみに、高校物理の教科書 [4] では次のようにして運動エネルギーが求められている。 v_0 を初速度、 v を時刻 t における速度、 a を加速度、 x (m) を時刻 t における変位とすると、 x は、 y 軸を速度、 x 軸を時間、直線の傾きを a としてできる台形の面積から求められ、変位の式は $x = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ となる。 $v = v_0 + at$ から t を消去すると等加速度運動における速度と変位の関係式 $v^2 - v_0^2 = 2ax$ が得られる。そこで、速度 v (m/s) で運動する質量 m (kg) の台車が持つ運動エネルギーは、台車が障害物（箱）に触れてから静止するまでの間に x (m) だけ移動し、その間に箱は一定の力 F を及ぼすという仮定から求められている。台車の運動方程式は $ma = -F$ （台車は箱から $-F$ の反作用を受ける）、従って、台車は負の加速度 $a = \frac{-F}{m}$ で等加速度運動をする。 $v = 0$ （静止するから）、初速度 $v_0 = v$ だから、それらを速度と変位の関係式に代入すると $0^2 - v^2 = \frac{-2Fx}{m}$ となり、仕事 Fx （運動エネルギー）は $\frac{mv^2}{2}$ となる。この場合、台車のエネルギーは箱からの負の反作用の運動量から求められたことになる。ここには、少なくとも数式の便利さとか特別な利益といった理由は含まれていない。物理学者は計算に心を奪われて、思考する習慣をまるで失くしていたので、長い間、両者の関係を認識できず、一方のものを測るときは $\frac{mv^2}{2}$ を用い、他方のものを測るときは mv^2 を平気で用い、最後に両方に対して $\frac{mv^2}{2}$ を採用するのだが、その理由たるや計算が簡単だという理由からだ (E) と、事の本質をとらえることができない学者を半ば揶揄することでエンゲルス論稿は終わっている。

現在の科学の世界や日常でも似たようなことがたくさんあるように思われる。科学上のことだからとか、長いあいだ親しんだ事柄とか、その道の権威や社会的地位などに無意識にとらわれて、自分の頭で考えることや批判することを忘れ、周囲の雰囲気追随するという陥穽に落ち込み、真実や真理が見えなくなっている。

3 活力論争の幻影

活力論争が始まってから 300 年以上も経った現在、まだその名残があることを最近の二つの文献を例に紹介する。その一つは、カントの『活力測定考』（この論文は 1746 年にケーニヒスベルク大学の卒業論文として提出された）を引用しながら活力論争に言及している松山壽一の著書 [8] である。松山は、その序文で、「このような研究方法、「実際に件の発言がどのようなテキストを用いてなされたか、という過去のテキスト連関こそが肝心要で、そうしたことの探求」によって、カントの処女作『活力測定考』を読み解こうとする試みである」と、述べている。松山によるカントの論文に関わる部分をそのまま引用する。本文中で、「物体が運動の根拠を自分自身の内部にもつべきこと。これがカントにあつては活力たらしめている」、また、「カントが真の力学と自称する彼の力学はすこぶる曖昧で混乱したものでしかない」と言っている。この曖昧で混乱しているというのは、カントがあるときは数学が扱う物体（慣性運動、 mv という運動量を指すと解釈される）を、別なときには自然が扱う物質（「自然が扱う物質」とは何を意味するのであろうか。ともかく、等加速度運動または mv^2 をという運動量を指すようだ）を区別していることにある。さらに、「カントの力学の根本的な発想は、物体が外部から何らかの仕方で受け取ったあるもの——今日の用語を用いればエネルギー——を自分の内部で維持、蓄積し、しかる後にそれが活性化されて、外部からのエネルギーの補充なしに自力で運動するに至ったものである」と、要約している。ここはライプニッツの活力を表現しているようにとれる。松山は、カントがライプニッツの活力概念を批判するデカルト的立場に立っていると言っているが、カントがどちらの立場かは本書からは判別し難い。

こうしたことから、松山自身が先述した二種類の運動を理解していないことと、運動の形態変化に気づいていなかったカントがいかに活力という概念の構築に苦闘したかが想像される。しかし、松山は「実際上は、活力論争に決着をつけたのは、活力論争が単なる名目上の争いにすぎないと看破したダランベールだった」と 100 年以上前のズーターの結論を復活させている。このことから、いくら松山が、「筆者が再三再四強調してきたとおり、自然科学的なテキストの解釈はおろか、少々まともに理解するということさえ、同時代の複数の他のテキスト（数々の一次文献）との比較照合、可能なかぎりの時代の思想状況の再現もしくは復元の努力が、筆者称するところの概念史的研究ぬきには不可能だということである」と力説しても、この論争の本質を見抜いていたエンゲルスの論証を知てみると、その内容は空疎に響かざるをえない。松山の著書に述べられていることは、活力論争の焦点を外した内容（カントは誰の著書を引用したとか、しなかったとか、また誰の説と類似しているとかいないとか、云々）で、活力論争の渦中の時代にタイムスリップした感覚を覚える。

二つ目は、有賀暢迪の「活力論争は何だったのか」と題した 2009 年の論文 [1] である。そこで、有賀は「活力論争と呼び習わされている 18 世紀の論争は、科学史上まれに見る奇妙な論争である。論争当事者たちが何を議論していたのかがそもそも判然としないからである。現代の観点からすれば、この論争は端的に言って無意味にみえる」。また、「力を時間で積分したものの（力積）は運動量（ $\int F dt = mv$ ）に等しく、距離で積分したもの（仕事）は運動エネルギー（ $\int F ds = \frac{mv^2}{2}$ ）に等しい。それゆえ二つの尺度はどちらも正当であつて（既に見てきたように、どちらも正しいという主張は 18 世紀の中頃からあった一筆者）、この論争は「本質的に言葉の問題にすぎなかった」のだとしばしば主張されてきた」と書いている。これは、「 mv は時間との関連での力の尺度で、 $\frac{mv^2}{2}$ は距離との関連での力の尺度」ということの形を変えた表現で、先

述したように結局、 mv^2 は mv と同じものということに帰着する。ここで、力を距離で積分したものが仕事を表さないことは、先のエンゲルスの仕事の概念の定義で理解される。続いて、「実は、一般にほとんど知られていないが、活力論争に対する上のような見方は 1960 年代から 70 年代にかけて発表された一連の歴史研究によってほぼ完全に覆されている」とある。「活力論争に対する上のような見方」を「言葉の問題にすぎない」と解釈すると、言葉の問題には還元できないことが明らかにされた、つまり、シャトレの言ったように「活力論争は断じて名前の問題ではない」ということが明らかになったということであろうか。もしそうだとすると、なぜ言葉の問題に還元できないかの理由がこの論文からは読み取れない。

有賀が紹介している 1960 年代に始まる一連の活力論争の歴史の中で、アメリカの科学史家ハンキンスが、1965 年に、「ダランベール神話（鶴の一声を指す）」に対して明確に疑問を投げかけたことと、この論争に「(運動の) 尺度」と「(運動の) 保存」という二つの論点があったことを指摘したことは興味深い（エンゲルスは 129 年前に既に指摘していたのだが）。また、活力論争の終結に対してダランベールは何の役割も果たさなかった、という有賀の指摘も重要である。だが、有賀は、「この論争が我々にとって無意味に見える最大の理由は、彼ら（先行論者）の共有していた前提を我々が失っていることにある」と、述べている。有賀によるこの前提というのは、活力論争の当事者たちが現代とは全く異なる枠組みの中で議論を行っていたことを意味する。枠組みというのは、あらゆる運動の変化は物体同士の衝突によってひき起こされるという「デカルトの枠組み」である。さらに、「そして重要なことに、その衝突の際には一方の物体から他方の物体へ「力」が移され、この「力」は全体として保存されると考えていたとされる。活力論争の当事者たちが「力」と呼んでいるものは、今日我々が理解している「外力」とは異質な、今述べたような概念だったのである」と言っている。言い換えると、現代の我々は「力」を「外力」（外部から加えられる力）で表し、それに対して活力論争の当事者たちは「力」を外力とは違ったもの（物体の内部にある保存される力？ — 筆者の解釈）で表していることになる。そうであるから、有賀は「このことは同時に、活力論争がいつ終わったのかという問いに対して一つの答えを与えてくれる」と、考える。すなわち、スコット（1970 年）の議論に基づけば、それは「硬い物体（非弾性物質）」が放棄された時（「力は保存されない」ということを放棄することと同義）であり、パピノーの主張（1977 年）に基づけば、デカルトの枠組みが放棄された時（「力は保存される」ということを放棄することと同義）であるということになると、活力論争の終結を定義づけている。

有賀の主張は、「力」というのは現代では外力であるから、「力」がそのように認識された時に論争は終わる。だから、それとは異質な要素、「硬い物体」（力は保存されない）と「デカルトの枠組み」（力は保存される）が放棄された時に論争が終わったのだということにつきる。換言すると、運動する物体の衝突において、弾性体では保存され、非弾性体では保存されないという相矛盾する「力の保存」という概念が放棄された時に論争が終わったということになる。これは矛盾の安易な回避で、産湯を捨てる時に赤子を一緒に捨てるような議論である。エンゲルスが砲弾の衝突で明らかにしたように、硬い物体（非弾性体）の衝突とデカルトの枠組み（弾性衝突の際の力の保存）は放棄できる要素ではない（それらは結びついている）。だから、これら二つが放棄された時に論争の終結ではなく、さらに無意味な論争に導くだけである。「活力論争の原因が「運動量の定義」と「活力の保存」にあり、二つの問題が並行して議論されていたと考えるのが適当であろう」と有賀は言っているのだが、それらの関連については語られていない。

最近の前二者の論文を紹介したが、共通しているのはエンゲルスの論稿が一切取り上げられ

ていないことにある。エンゲルスの論文を虚心に読み解いたなら、また別な視点から活力論争の本質に迫ることができるのではないと思われる。今やこの論争は、「死んで柩に納められ、手厚く葬られたものが、どうしてこの地上に？ 今日まで静かに死者を守ってきた厚い墓石が、いまさら口を開いて亡骸を吐き出すとは？」とつぶやくハムレットの疑念ほどの意味はない。

4 現在の初等物理学における運動と仕事

高校物理の教科書 [4] では、運動と仕事の関係について次のように説明されている。「運動している物体は仕事をすることができ、仕事をする能力をもつとき、その物体はエネルギーをもつという。走行中の自動車が壁に衝突して静止するとき、自動車がもつエネルギーは壁や車体を壊すエネルギーに使われる。一般に、運動して物体がもつエネルギーを運動エネルギーといい、 $\frac{mv^2}{2}$ で表される。速さ v で運動している質量 m の物体は、 $\frac{mv^2}{2}$ の仕事をする能力をもっている」と表記され、運動エネルギーと仕事が同じエネルギーで表されている。また「物体が壁などに衝突して失う運動エネルギーは、接触部分でぶつかりあう原子や分子の熱運動エネルギーに変わる」と、先述したエンゲルスによる弾丸とそれが衝突した装甲艦の鉄板との間のエネルギーの変換と全く同じように記されている（シャトレ公爵夫人が言いたかったのもこれである）。このことを正確に理解していた J. P. ジュール（1818-1889）は、仕事とそれによって発生する熱量の間に比例関係（熱の仕事等量）を見出した。それゆえ、熱量と仕事の両方は J（ジュール）という単位で表されることになった [6]。現在の物理の教科書 [4] にはエンゲルスの論証した方向で運動の形態変化が記述されている。自然現象を虚心にありのままに記載するのなら、好むと好まざるとにかかわらず弁証法的にならざるをえないということの一つの例証といえる。この場合の弁証法的とは、二種の運動の表現をどちらが正しいかという絶対的な対立としてとらえるのではなく、またそれらを硬直した変化のないものとしてとらえるのでもなく、運動は変化するものという柔軟な視点でとらえることを意味している。弁証法とは、ある特定の思想家の特殊で、偏ったものの見方、考え方ではなく、自然や社会をありのままにわれわれの脳髄に投影し、反映（記録、記述、表現など）すると弁証法的になるという、ただそれだけのことである。

5 結論

エンゲルスによる自然現象の弁証法的な理解と論証は科学の進むべき方向を示す羅針盤だったと言える。アリアドネの糸のように紛糾した過去の活力論争において、次の四点がエンゲルスによって明らかにされた。1) 二種類の運動の尺度の違いが明確にされた。2) ある運動量 $\frac{mv^2}{2}$ を持つ物体が、衝突などによる運動の形態変化によって失われる運動エネルギーは別の形態のエネルギーに変換し、その際、エネルギーは保存されることを示した。3) 運動の形態変化が起こるときに仕事が成される、という仕事の概念を明確にした。4) 運動の形態変化に気づかなかったことが、活力論争の原因だったということを明示した。畢竟、活力論争は言葉上、数学上、哲学上の問題ではなかったのである。「19 世紀後半に活力問題（活力論争のこと）も真に解決して、古典力学が完成する…」とあるが [5]、上述のように、この時代においても当代一流の物理学者のだれ一人この問題を真に解決することができなかった。こうしたことから、エンゲルスの論稿をもって実質的に活力論争は決着がついたと言える。意図的であるかないかにかかわらず、エンゲルスの論文を視野の外に置くことは、無益な論争を新たに蒸し返すことにし

かならないであろう。

参考文献

- [1] 有賀暢迪. 2009. 「活力論争とは何だったのか」, 『科学哲学科学史研究』, no. 3:39–57.
- [2] エンゲルス, F. 1956. 「運動の計測度。一仕事」, 『自然の弁証法』, 田辺振太郎訳, 岩波文庫.
- [3] 川島慶子. 1987. 「活力論争の一断面：シャトレ＝メーラン論争に見る二つの「力」」, 『科学史・科学哲学』, no. 7:1–13.
- [4] 國友正和他. 2004. 『高等学校：物理 I』, 教研出版.
- [5] 西條敏美. 1993. 「カント著『活力測定考』(1746)に見る活力論争の争点と力の概念」, 『徳島市立高等学校紀要』, no. 27:13–23.
- [6] 西條敏美. 2005. 「エネルギー ジュール Joule J」, 『理科教室』, 2005 年 11 月号: 98–101.
- [7] 樋浦明夫. 2008. 「F. エンゲルスの「運動の基本的諸形態」(『自然の弁証法』)から見えてくること」, 『徳島科学史雑誌』 27:2–50.
- [8] 松山壽一. 2004. 『若きカントの力学観：活力測定考を理解するために』, 北樹出版.